УДК 004.93'1; 004.932; 528.85/.87(15)

Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск
220012, Беларусь, ул. Сурганова, 6, г. Минск, *blzrsk@newman.bas-net.by, ola@newman.bas-net.by*

Расширение возможностей обнаружения изменений внешнего облика наземных объектов по разностным гистограммам

L.A. Belozerskyy, L.V. Oreshkina
United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus, c. Minsk
Surganova st, 6, 220012, c. Minsk, Belarus

Enhancement of Changes Detection of Ground Objects External Shape Using Subtractive Histograms

Л.А. Бєлозерський, Л.В. Орешкіна
Об'єднаний інститут інформатики НАН Білорусі, м. Мінськ
220012, Білорусь, вул. Сурганова, 6, м. Мінськ

Розширені можливості знайдення змін зовнішнього вигляду наземних об'єктів за різницевими гістограмами

Статья представляет собой дальнейшее развитие метода селективно-яркостной сегментации изменений, обнаруживаемых и анализируемых по данным разновременной космической съемки интересующих объектов земной поверхности. На основе аналитического описания разностных гистограмм дана характеристика ситуаций возникновения ограничений в оценках яркостных интервалов изменений внешнего облика объектов и рассматривается метод преодоления их последствий.
Ключевые слова: зондирование, интервал изменений, маскирование, неразрешаемость компонент, разностная гистограмма, селективно-яркостная сегментация

In the article, the method of selective brightness segmentation of changes, which are found and analyzed by data of space survey made at different times of the ground surface objects of interest, is developed. On the basis of analytical description of subtractive histograms, the characteristics of situation of restriction in brightness interval changes evaluation is given, and the method for overcoming them is considered.
Key words: reconnaissance, variation interval, blinding, non-resolvability, component, differential histogram, selective brightness segmentation.

Стаття являє собою подальший розвиток методу селективно-яскравої сегментації змін, що знаходяться та аналізуються за даними різночасової космічної зйомки об'єктів, що цікавлять, земної поверхні. На основі аналітичного опису різницевих гістограм наведена характеристика ситуацій виникнення обмежень щодо оцінок яскравих інтервалів змін зовнішнього вигляду об'єктів та розглядається метод знешкодження їхніх наслідків.
Ключові слова: sensing, interval of changes, masking, component nonpermissive, difference histogram, selective brightness-based segmentation

Введение

Вопросы использования разностных гистограмм разновременных изображений не новы, хотя упоминания о возможностях их можно встретить в ограниченном числе источников, обычно не носящих характер фундаментального обобщения, например, [1-3] и др.

К сожалению, слова «разностная гистограмма» встречаются здесь только в общей формулировке пригодности ее для «оценки различия гистограмм», или, более конкретно, для решения задач таких областей применения, как анализ видеопоследовательностей, классификация текстур, а также классификация монтажных планов в задачах повышения качества кинематографического изображения. В обработке космических снимков разностная гистограмма не упоминается.

Источники, считающиеся основополагающими в обработке изображений (например, [4], [5] и др.), а тем более в обработке изображений космической съемки, вопросы применения разностных гистограмм также обходят вниманием.

Наиболее полное изложение методологии применения разностных гистограмм в селективно-яркостной сегментации обнаруженных изменений внешнего облика объектов космической съемки содержат статьи [6-8]. Проявляя признаки инструмента для автоматического (программно реализуемого) решения этой задачи, в отдельных случаях они обусловливают заниженные значения яркостных интервалов и площадей интересующих изменений. Причина этого состоит в обнаруживаемом взаимном влиянии распределений вероятности яркостей компонент любого объекта космической съемки, лежащих в основе формирования его гистограммы [9].

Понимание существа возникающих ситуаций взаимодействия распределений и разработка способов преодоления их последствий лежат через аналитическое представление разностной гистограммы.

Целью статьи является разработка метода по преодолению возникающих ограничений оценивания яркостных интервалов в развиваемом авторами методе селективно-яркостной сегментации изменений, обнаруживаемых и анализируемых по данным разновременной космической съемки.

1 Аналитическое описание разностной гистограммы

Как известно [7], процесс обнаружения изменений внешнего облика объекта космической съемки сопровождается соответствующими яркостными интервалами разностной гистограммы. Установлено, что они представляют собой исходные данные для автоматической (программно реализуемой) оценки площадей и пространственных положений компонент объекта, изменивших свои свойства за время между последовательно выполняемыми съемками.

В то же время результаты построения моделей гистограмм изображений объектов космической съемки [9] вносят некоторую неуверенность в однозначности такого заключения. В отдельных случаях некоторую неполноту можно обнаружить экспериментально. Основа возникающей неуверенности может быть одна – наличие пересечений между собой плотностей распределения вероятностей (ПРВ) яркостей отдельных компонент, образующих ПРВ яркостей объекта съемки в целом.

Усугубить такие опасения могла бы, казалось, не только возможная близость математических ожиданий яркостей упомянутых компонент объекта. Теоретически пересечения распределений являются следствием представления компонент непрерывными ПРВ яркостей каждой из них. Вполне очевидно, что такие распределения реализуются (теоретически имеют значения) в пределах всего диапазона регистрируемых яркостей изображения космической съемки. То есть к мешающим однозначной реализации процессам определения интервалов яркостей изменений нужно было бы относить все компоненты, так как ветви спада их ПРВ яркостей существуют в пределах каждого интервала, в том числе в пределах интервала яркостей интересующей компоненты изменений.

Для того чтобы разобраться в таких опасениях, наиболее продуктивной оказывается возможность использования упомянутых принципов моделирования гистограмм. При этом необходимо принимать во внимание, что между представлением гистограмм в виде смесей непрерывных ПРВ яркостей и представлением их в виде распределений пикселей по яркостям существует достаточно простая связь. В то же время использование первого представления позволяет сделать последующее изложение теоретически более доступным и наглядным для понимания процессов. В аналитических преобразованиях возникает возможность рассмотрения роли каждой компоненты отдельно от других.

ПРВ яркостей любой компоненты объекта съемки входит в суперпозицию распределений всех его компонент со своим относительным весом, пропорциональным занимаемой площади этой компонентой в его составе. Отсюда модель ПРВ яркостей эталонного изображения, с которым предстоит сравнение для образования разностной ПРВ (разностной гистограммы) выглядит как сумма плотностей распределений вероятностей яркостей компонент объекта (со своими средними значениями и дисперсиями), взвешенных относительными площадями каждой из них в составе этого объекта:

$$p_Э(L) = \sum_{k=1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o}, \tag{1}$$

где $K_Э$ – общее число компонент эталонного изображения до изменений объекта (штатное состояние); S_0 – площадь объекта в целом; $p_{Эk}(L)$ – ПРВ яркостей *k*-ой компоненты штатного состояния объекта; S_0 – площадь *k*-ой компоненты.

В интересующем случае приведенный комплекс или сумму взвешенных распределений компонент рассматриваемой модели ПРВ яркости эталона можно разделить на две составляющие:

– модель ПРВ яркостей компонент объекта, которые не претерпели изменений, обнаруживаемых в очередной съемке: $\sum_{k=1}^{K_{ЭС}} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o}$;

– модель компонент объекта, на площади которых в очередной съемке возникли его изменения: $\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o}$.

Здесь $K_{ЭС}$ – число компонент в составе модели эталонного распределения, не изменившихся за время между съемками.

Соответственно рассмотренному яркостному составу объекта предшествующее представление плотности распределения вероятностей (ПРВ) яркостей компонент эталонного изображения (1) в расчете на общий случай (наличие изменений) должно быть заменено суммой приведенных выше составляющих:

$$p_Э(L) = \sum_{k=1}^{K_{ЭС}} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_0} + \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_0}. \tag{2}$$

Изображение очередной или текущей съемки того же объекта в отличие от эталонной, хотя и содержит те же пространственные компоненты, но распределения их яркостей в соответствии с изменениями внешнего облика объекта могут быть изменены частично или полностью. То есть в состав его войдет тот же эталонный комплекс распределений, не претерпевших изменений компонент (первое слагаемое

выражения (2)), компоненты, претерпевшие изменения взамен второго слагаемого выражения (2), выделенного как комплекс компонент, порождающих изменения, и дополнительно – компоненты или компонента изменений.

Компонента изменений, как и все остальные, описывается своей плотностью распределения вероятностей яркостей $p_И(L)$, взвешенной относительной площадью ее $S_И / S_0$ в составе объекта:

$$p_И(L)\frac{S_И}{S_0}. \tag{3}$$

Рассчитывая на изменения такого рода, площадь одной *k*-ой компоненты эталона ($k \in \overline{K_{ЭС}+1, K_Э}$) или ряда компонент из этого состава, в пределах которой или которых произошли изменения (2), при включении в состав ПРВ яркостей, изображение текущей съемки объекта не может не измениться.

Так или иначе, но в рассмотренных случаях (полное или частичное изменение) соответствующая компонента «отдает» часть или всю свою площадь для новой по статистическим характеристикам компоненты или ряда таких компонент. То есть она оказывается оккупированной занявшими ее пространство компонентами или компонентой изменений. При полной оккупации эта, с одной стороны, оккупированная или, с другой стороны, порождающая изменения компонента должна полностью исчезнуть, а при частичной – подвергнуться уменьшению по площади в силу того, что в ее пределах возникли изменения.

Характеризуя заимствование (оккупацию) части площади объекта компонентой изменений, введем коэффициент заимствования α_k, значения которого лежат в диапазоне $0 \div 1$. Тогда часть площади, заимствованная компонентой изменений у *k*-ой компоненты эталонного состояния объекта, в результате чего эта компонента превратилась в порождающую изменения, является разностью между площадями компонент эталонной S_k и текущей съемок объекта S_k^*:

$$S_И = S_k - S_k^* = \alpha_k S_k. \tag{4}$$

Соответственно этому определяется площадь части, оставшаяся неизменной в составе *k*-ой компоненты:

$$S_k^* = (1-\alpha_k)\cdot S_k. \tag{5}$$

Это приводит к общему выражению для модели тех компонент эталона, которые в гистограмме текущего изображения уменьшили свою площадь:

$$\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{S_k^*}{S_o} = \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{(1-\alpha_k)S_k}{S_o}. \tag{6}$$

Одновременно, согласно (3) и (4), уточняется и ПРВ яркостей самой компоненты изменений, как составной части интересующей модели, если она представляет единственное изменение объекта, использующего части площадей всех компонент изменений[1]:

$$p_И(L)\frac{S_И}{S_o} = p_И(L)\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э}\frac{\alpha_k S_k}{S_o}. \tag{7}$$

[1]Для достижения большей прозрачности выводов здесь рассматривается одна компонента изменений, возникшая на площади, приведенной в (2) суммы компонент изменений, что не исключает общности получаемых результатов.

То есть, если это изменение объекта единственное, как здесь принято, то оно может возникнуть как в пределах всех его компонент, подвергшихся этому изменению, так и одной его компоненты. В последнем случае только для единственного номера среди номеров диапазона $k = \overline{(K_{ЭС}+1), K_Э}$ окажется, что $\alpha_k > 0$.

На основе рассмотренного определения площадей (4), (5) и ПРВ яркостей компонент (6), (7) для единственного изменения объекта уточняется состав модели ПРВ яркостей изображения текущей съемки:

$$p(L) = \sum_{k=1}^{K_{ЭС}} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o} + \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{(1-\alpha_k)S_k}{S_o} + p_И(L)\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э}\frac{\alpha_k S_k}{S_o}. \qquad (8)$$

Если же имеем дело с множественными изменениями, то получим:

$$p(L) = \sum_{k=1}^{K_{ЭС}} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o} + \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{(1-\alpha_k)S_k}{S_o} + \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{kИ}(L)\frac{\alpha_k S_k}{S_o}.$$

Теперь без проблем приходим к модели разностной ПРВ яркостей объекта как аналитической характеристике изменений в виде разности между ПРВ яркостей компонент текущей (8) и эталонной (2) съемок:

$$\Delta p(L) = p(L) - p_Э(L) = \sum_{k=1}^{K_{ЭС}} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o} + \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{(1-\alpha_k)S_k}{S_o} +$$

$$+ p_И(L)\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э}\frac{\alpha_k S_k}{S_o} - \sum_{k=1}^{K_{ЭС}} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o} - \sum_{k=K_Э+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o} = \qquad (10)$$

$$= \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{(1-\alpha_k)S_k}{S_o} - \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э} p_{Эk}(L)\frac{S_k}{S_o} + p_И(L)\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э}\frac{\alpha_k S_k}{S_o}.$$

И, наконец, в окончательном виде, выполняя вычитание двух первых компонент, получим следующее выражение для модели разностной ПРВ яркостей объекта по результатам его съемки, как плотности распределения вероятности яркостей, лежащей в основе формирования разностной гистограммы:

$$\Delta p(L) = p_И(L)\sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э}\frac{\alpha_k S_k}{S_o} - \sum_{k=K_{ЭС}+1}^{K_Э}\frac{\alpha_k S_k}{S_o} p_{Эk}(L). \qquad (11)$$

Таким образом, разностная ПРВ яркостей объекта аналитически состоит из положительной части ее, представляемой ПРВ яркостей компонент изменений, ограничиваемых значениями ПРВ яркостей частей компонент, порождающих эти изменения и образующих отрицательную часть разностной ПРВ яркостей. При этом интеграл разностной ПРВ равен нулю, а, следовательно, площади положительной и отрицательной частей разностной ПРВ равны между собой.

Компоненты объекта, не подвергнутые изменениям, в разностной ПРВ яркостей отсутствуют, то есть не являются мешающими для определения характеристик отображаемой компоненты изменений.

Отсюда, наконец, следует, что причиной ограничений интервалов яркостных изменений, сопутствующих близости ПРВ яркостей, необходимо считать обнаруживаемое здесь неразрешимое или плохо разрешаемое взаимное расположение плотностей распределений вероятностей яркости компонент двух слагаемых выражения (11). Причем и

степень контактирования этих распределений[1] друг с другом, и степень изменений при неполном разрешении в составе разностной ПРВ определяются одними и теми же параметрами (площади компонент и статистические характеристики яркости).

Отсутствие на практике априорной информации об относительных площадях компонент объекта конкретной космической съемки оставляет в распоряжении исследователя всего один случай, когда влияние компонент ПРВ яркостей друг на друга отсутствует. Этот случай характеризуется полным разрешением ПРВ порождающей и порожденной компонент.

Для этого должны существенно отличаться, прежде всего, математические ожидания ПРВ яркостей порождающих компонент $\left(L_{0k} \in p_{Эk}(L)\right)$ и компонент изменений $\left(L_{0i} \in p_i(L)\right)$. Кроме того, желательной должна быть и минимальность среднеквадратических разбросов яркостей тех и других компонент, чтобы соответствующие интервалы яркостей практически возможных значений взаимодействующих распределений не пересекались. В остальных случаях приходится иметь дело с большей или меньшей степенью неразрешимости плотностей распределения вероятности компоненты изменений со следующими компонентами, образующими разностную ПРВ яркостей:

1. Компонента, порождающая данное изменение (своя порождающая компонента).
2. Компонента, порождающая другие изменения (сторонняя порождающая компонента).
3. Компонента изменений, порожденная своей компонентой (родственная компонента изменений).
4. Компонента изменений, порожденная сторонней компонентой (чужая компонента изменений).

2 Неразрешаемость плотностей распределения вероятности яркостей компоненты изменений и компоненты, порождающей эти изменения

На рис. 1 рассматривается ситуация, соответствующая представлению разностной гистограммы (11) для единственной порождающей изменения компоненты объекта (ПК) и единственного ее изменения. При этом отражено постепенное ухудшение их разрешения в силу уменьшения взаимного яркостного удаления (ΔL_0).

Здесь зрительно можно проследить, каким образом при контактировании (неразрешимое состояние) плотностей распределения происходит укорачивание интервала яркостей компоненты изменений (КИ) в составе разностной плотности распределения.

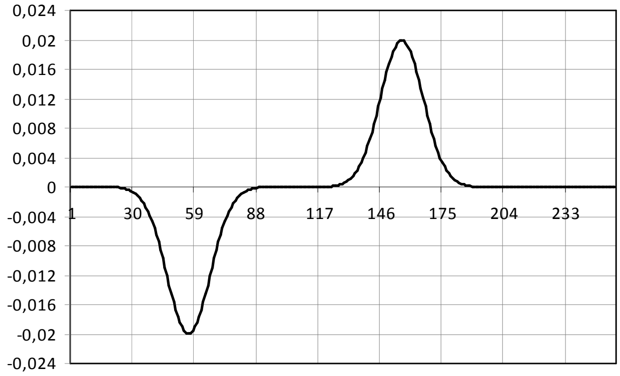
Рассмотренная аналитическая модель разностной ПРВ яркости объекта (11) позволяет получить условие возникновения ограничений обнаруживаемой компоненты изменений. В этих целях, оперируя для простоты однокомпонентным объек-

---

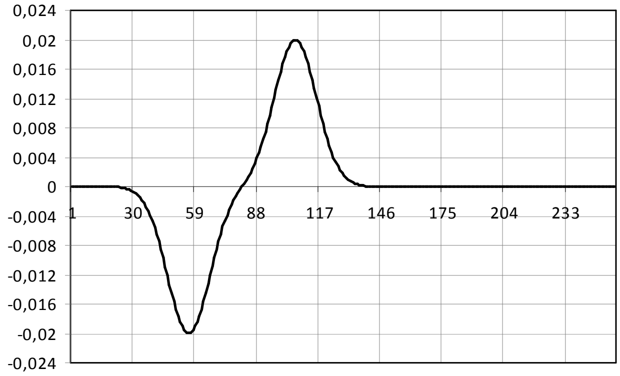
[1]Для пары нормальных распределений вероятностей их разрешаемое состояние можно характеризовать интервалом яркостей практически достаточного взаимного яркостного удаления $L_{12} \geq 3\sigma_1 + 3\sigma_2$, определяемого по правилу 3σ для каждого из пары контактирующих распределений; если же от ПРВ яркостей переходить к гистограммам яркостей их пикселей, то указанный интервал определяется в явном виде как расстояние между границами соответствующих группировок.

том и единственной КИ, легко придти к тому, что определению яркости граничного значения яркостей контактирующих распределений этих компонент соответствует следующее уравнение:

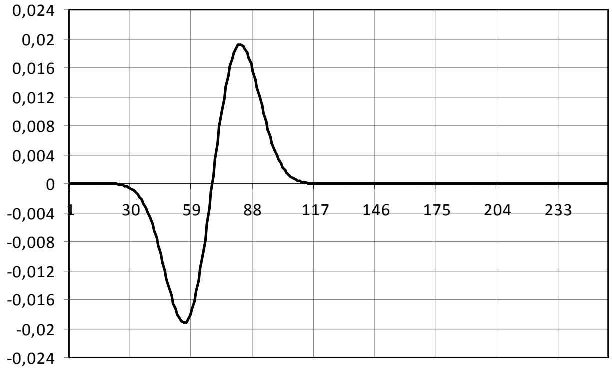
$$p_И(L) - p_П(L) = 0. \qquad (12)$$



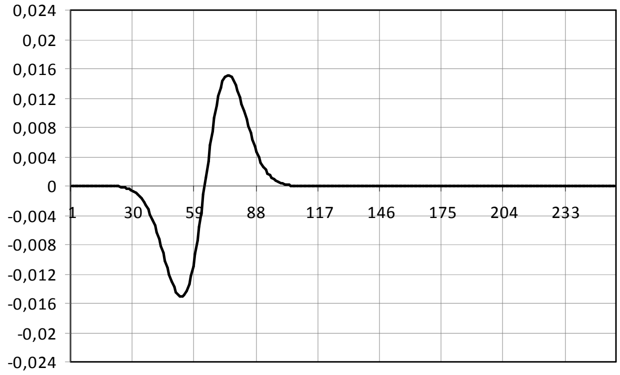
а) $\Delta L_0 = 100$



б) $\Delta L_0 = 50$



в) $\Delta L_0 = 25$



г) $\Delta L_0 = 15$

Рисунок 1 – Зависимость искажения распределения яркостей КИ (ПРВ яркостей положительной части графика) в зависимости от ее яркостного удаления ΔL_0 от изменяемой части ПК (ПРВ яркостей отрицательной части графика)

Таким образом, значение яркостной границы ($L = L_{ГР}$) должно зависеть только от параметров исходных плотностей распределений вероятностей яркости порождающей компоненты и КИ.

В частности, используя нормальную аппроксимацию ПРВ, после очевидных преобразований приходим к квадратному уравнению в определении граничного значения яркости:

$$L^2 - 2\frac{(\sigma_И^2 m_П - \sigma_П^2 m_И)}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)} L + \left[\frac{(\sigma_И^2 m_П^2 - \sigma_П^2 m_И^2)}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)} + \frac{2\sigma_И^2 \sigma_П^2}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)} \ln\frac{\sigma_П}{\sigma_И}\right] = 0.$$

Решение его:

$$L_{ГР} = \frac{(\sigma_И^2 m_П - \sigma_П^2 m_И)}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)} \pm \sqrt{\left[\frac{(\sigma_И^2 m_П - \sigma_П^2 m_И)}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)}\right]^2 - \left[\frac{(\sigma_И^2 m_П^2 - \sigma_П^2 m_И^2)}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)} + \frac{2\sigma_И^2 \sigma_П^2}{(\sigma_И^2 - \sigma_П^2)} \ln\frac{\sigma_П}{\sigma_И}\right]}, \qquad (13)$$

где $m_П, m_И$ – математические ожидания яркостей порождающей компоненты и компоненты изменений; $\sigma_П^2, \sigma_И^2$ – дисперсии их яркостей.

Теоретически не существует разрешаемого положения по яркостям между ПК и КИ в силу асимптотического приближения ветвей ПРВ яркостей к нулю.

При этом очевидно, что обнаруживаемая часть плотности распределения яркостей изменений (КИ) характеризует только те из них (согласно рис. 1 в диапазоне $L_{ГР} \div 255$), которые ранее отсутствовали в порождающей компоненте.

То есть эта часть ПРВ играет роль характеристики яркостного изменения с потерями, вызванными неразрешенностью распределений вероятности яркостей компонент.

Реально имея дело с гистограммами распределения яркостей, придется столкнуться и с обнадеживающими обстоятельствами, когда протяженность соответствующего интервала ограничивает дискретная выборка пикселей.

Причем чем меньше размеры изображения и его яркостные разделяемые компоненты, а следовательно, меньше число составляющих его пикселей, тем более ограниченными в силу естественных причин (ограниченность выборки) оказываются оцениваемые и практически имеющие место яркостные интервалы.

То же самое происходит при ухудшении пространственного разрешения космической съемки. Кроме того, чем больше яркости изменений, тем с меньшими ограничениями придется иметь дело.

3 Особенности неразрешимости компонент изменений с компонентами, отличающимися и неотличающимися по происхождению

Рассматривая взаимодействия компоненты или компонент изменений с компонентами, не являющимися для нее порождающими, можно отметить возникновение, казалось бы, тех же ограничений. Для каждого из таких случаев характерны свои особенности.

Так, неразрешимость плотностей распределения вероятности яркостей компоненты изменений и сторонней порождающей компоненты приводит всего лишь к видимости искажения. Это фактически маскировка истинной протяженности, вызывающая заранее неизвестное сокращение яркостного интервала изменений. Величина его, отражаемая разностной гистограммой, оказывается меньше истинной.

Маскировку отличает то, что сторонняя порождающая компонента пространственно (в составе изображения, а не разностной гистограммы) занимает свое положение, отличающееся от положения рассматриваемой КИ.

Точно также, как любая из сторонних порождающих компонент, так и порожденные ими компоненты изменений, в отличие от интересующей КИ, имеют свои собственные пространственные положения в пределах объекта.

Отсюда компоненты изменений, имеющих разное происхождение, при взаимодействии (пересечении) в процессе образования разностной гистограммы создают только видимое ограничение в силу того же отличающегося пространственного положения.

Особый случай неразрешимого взаимного расположения представляют родственные компоненты изменений, то есть имеющие одну и ту же ПК. Неразрешимость их распределений не играет какой-либо отрицательной роли в обнаружении возникающих изменений. Здесь они совместно характеризуют одну ПК.

К подобной паре компонент можно относиться, как к единственному изменению, имеющему более сложное распределение вероятности яркостей, чем каждое из них. Интересоваться при этом, какими составляющими оно образовано, не представляет смысла.

4 Зондирование – путь снятия ограничений отображаемой протяженности интервалов яркостных изменений

Для того чтобы обнаружить ситуацию маскировки изменений в распоряжении исследователя находятся два взаимодополняющих источника информации о соответствующей компоненте:

– интервал яркостей компоненты изменений в составе разностной гистограммы;

– бинаризованный сегмент компоненты изменений.

Эти источники входят в состав селективно-яркостной сегментации [7]. Однако их использование в стремлении к обнаружению указанной ситуации для частичного или полного устранения ее влияния на ограничения яркостных интервалов и площадей изменений отличается своей спецификой. Заключается она в необходимости проверки возможности увеличении протяженности *k*-го интервала изменения ($L_{k\min} \div L_{k\max}$), оцененного по разностной гистограмме, для начала на одну единицу яркости в направлении предполагаемого ограничения. Априорная неопределенность этого направления заставляет осуществлять проверку в обе стороны (меньших и больших яркостей).

Правомерность указанного расширения на единицу в одну или другую сторону может быть проверена в результате автоматически выполняемых действий, входящих в состав операций селективно-яркостной сегментации:

– бинаризация нового интервала яркостей $L_{k\min} \div (L_{k\max} + 1)$ или $\left(L_{k\min} - 1\right) \div L_{k\max}$ для текущего и эталонного изображений;

– вычитание получаемых множеств, обеспечивающее прямую оценку площади изменения, соответствующей новому интервалу.

Специфика их применения здесь состоит в итоговом сравнении полученной площади с величиной ее, определенной на интервале предшествующей (начальной) протяженности, то есть $L_{k\min} \div L_{k\max}$.

При положительном приращении площади логически правильно интервалу яркостей изменения приписать новые границы.

Процедура поиска истинной величины интервала яркостей изменения, размеры которого скрыты в разностной гистограмме вследствие взаимной маскировки компонент, представляет собой зондирование. Причем эта процедура может быть повторяющейся при положительном решении о расширении интервала на предшествующем шаге.

В целесообразности выполняемого расширения позволяет убедиться обнаруживаемое приращение площади сегмента изменений. То есть критерий целесообразности расширения *k*-го интервала для правосторонней маскировки выглядит, как выполнение неравенства:

$$S[L_{k\min} \div (L_{k\max} + \Delta L_p)] > S[L_{k\min} \div (L_{k\max} + \Delta L_p - 1)],$$

где $S[...]$ – площадь сегмента как функция яркостного интервала изменений; ΔL_p – пошагово изменяемая яркость расширения ($\Delta L_p = 1,2,3...$).

Для левосторонней маскировки это неравенство принимает такой вид:

$$S[(L_{k\min} - \Delta L_p) \div L_{k\max}] > S[(L_{k\min} - \Delta L_p + 1) \div L_{k\max}].$$

Очередной шаг производится для нового, расширенного на предыдущем шаге интервала, а процесс зондирования должен останавливаться, когда приращение площади бинаризованного сегмента изменений на очередном шаге прекращается. Об этом сигнализирует сохранение ее величины.

Таким образом, рассматриваемое зондирование должно стать элементом автоматически реализуемого процесса реализации принципов селективно-яркостной сегментации [7].

Внешний эффект расширения яркостных интервалов изменений можно наблюдать и оценивать на изображениях выделенных сегментов в сравнении с их начальной сегментацией. С целью демонстрации его на рис. 2а, б приведена пара разновременных (15 мая и 16 июля) изображений реальной космической съемки наземного участка сельскохозяйственного использования, содержащего три компоненты, подвергнутые вегетационным изменениям за время между съемками. Здесь же на рис. 2в, д, е демонстрируются сегменты каждого из этих участков, полученные бинаризацией начальных значений яркостных интервалов изменений, обнаруживаемых разностной гистограммой.

Наконец, выполненное расширение первого яркостного интервала в результате правостороннего зондирования такой возможности, приведшей к более полноценному отражению изменений сегмента, рассмотрено на рис. 2г. При этом начальная протяженность соответствующего интервала яркостей и сегментированная площадь по разностной гистограмме составляли $I_1 \approx 21 \div 33$ и $S_1 = 190926$ пикселей, а конечные – $I_1^* = 21 \div 39$ и $S_1^* = 204150$ пикселей. Пошаговый процесс возрастания площади отражает рис. 3.

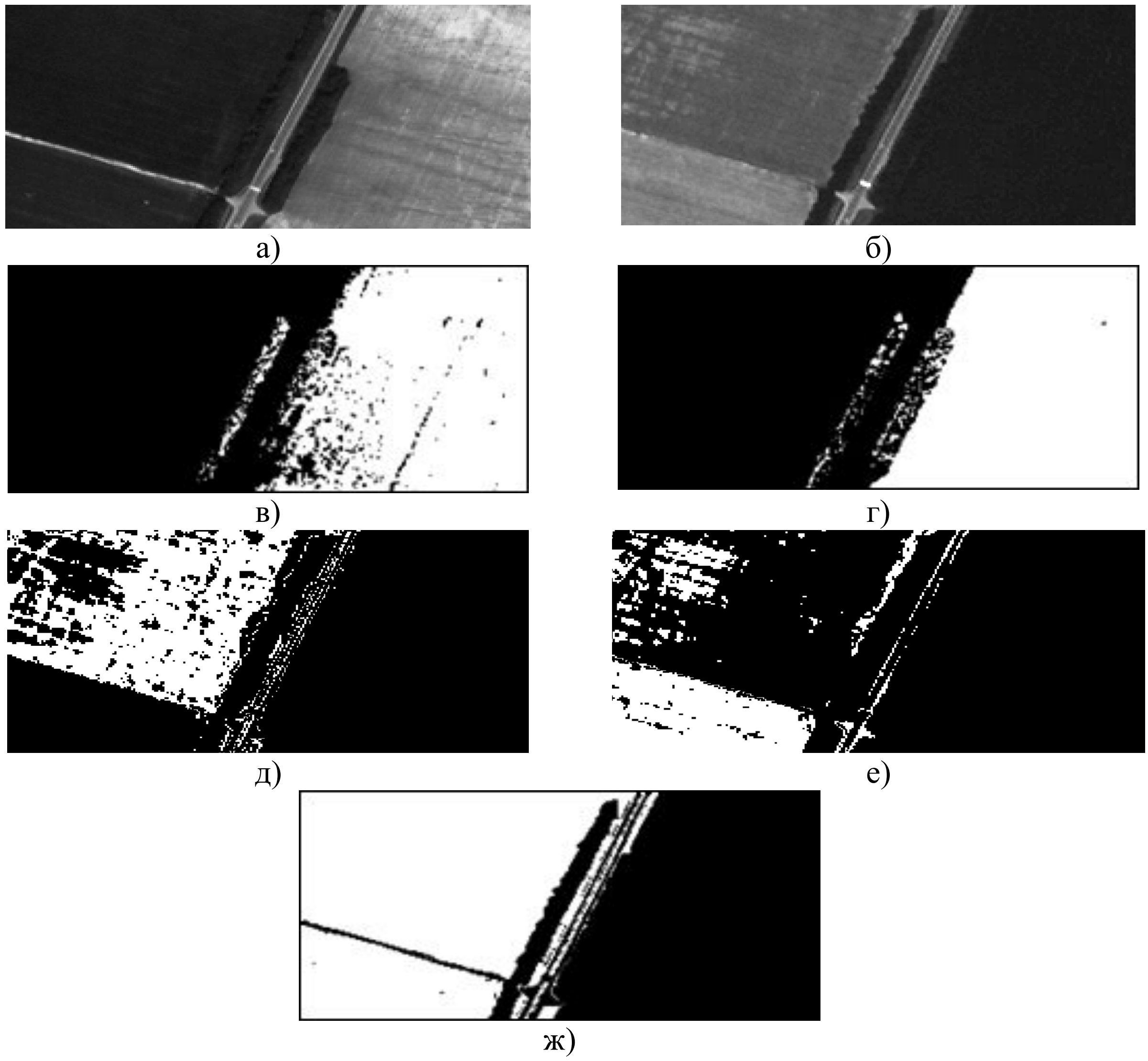


Рисунок 2 – Сопоставление результатов сегментации бинаризованных начальных яркостных интервалов и их расширенных значений (а, б – изображения разновременной космической съемки наземного участка; в, д, е – начальная сегментация каждого из трех интервалов изменений; г, ж - сегментация как результат расширения границ интервалов)

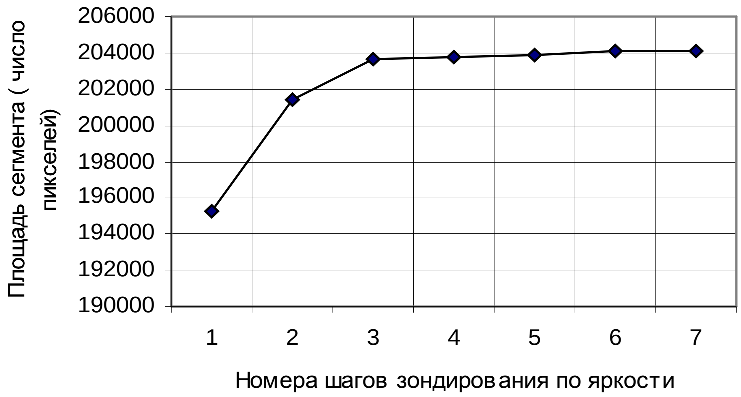


Рисунок 3 – Возрастание площади первого сегмента изменений при зондировании возможности расширения правой границы его интервала яркостей

В рассмотренном применении метода зондирования, как проверки возможности расширения начального значения интервала яркостей, определенного по разностной гистограмме, расширение выполнялось для его правой границы. Расширение левой границы по причине практического ограничения выборки компоненты изменений яркостью $L_{1\min} = 21$ оказалось невозможным, что подтвердила такая попытка, оказавшаяся одношаговой.

В основе образования второй и третьей компонент изменений, как показывает их сегментация на рис. 2д, е, лежат плохо разрешаемые (пересекающиеся) распределения яркостей. Об этом свидетельствует отсутствие бинаризованных значений яркостей в центре второй компоненты (рис. 2д) и появление их в тех же пространственных положениях (рис. 2е) при бинаризации третьей компоненты.

Отсюда проведенное расширение начальных интервалов второй и третьей компонент в результате последовательного зондирования такой возможности согласно закономерностям, рассмотренным в п. 3, должно было бы привести к их одновременной сегментации. Это при общем возрастании площади бинаризации изменений и демонстрирует рис. 2ж.

Выводы

На основе аналитического представления разностной гистограммы изображений разновременной космической съемки интересующего участка земной поверхности в статье рассмотрены естественные ограничения, возникающие при реализации автоматической (программно реализуемой) селективно-яркостной сегментации изменений. Естественная причина их возникновения – пересечения плотностей распределения вероятности яркостей компонент, составляющих яркостную картину объекта съемки.

Показано, что лишь при незначительности яркостей изменений объекта порождающая их компонента ограничивает соответствующие оценки. Однако полной потери информации здесь не происходит в результате предоставления компонентой изменений информации о значениях яркостей, которые появились дополнительно к входившим в состав порождающей (изменившейся) компоненты до изменений.

К основной причине возникающих ограничений отнесена маскировка истинных значений яркостей при пересечении плотностей распределения вероятности контактирующих компонент, подвергаемых изменениям и порождаемых ими, но имеющих отличающееся пространственное расположение в пределах объекта съемки. Снятие такого рода естественных ограничений обеспечивает рассмотренное пошаговое зондирование возможностей расширения яркостных интервалов изменений, начально оцениваемых по разностной гистограмме.

Литература

1. Томина Н.В. Автоматизированная обработка изображений биоткани в медицинской диагностике / Н.В. Томина, В.И. Мещеряков [Электронный ресурс]. – Режим доступа // http://iauoo.narod.ru/magazine/tomina.htm.
2. Unser M. Sum and Difference Histograms for Texture Classification / M. Unser. – IEEE Transactions on Pattern Analisys and Machine Intelligence. – Volume : PAMI-8 Issue:1. – P. 118-125.
3. Hammouche K. Multidemensional Texture Analysis for Unsupervised Pattern Classification / K. Hammouche, J.-G. Postaire [Электронный ресурс]. – Pattern Recognition Techniques, Technology and Applications, ISBN 978-953-7619-24-4, Edited by : Peng-Yeng Yin, Publisher : InTech, November 2008. – P. 163-196. – Режим доступа : www.intechopen. com/download/ pdf/pdfs_id/5785.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс ; [пер. с англ. ; под ред. П.А. Чочиа]. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2006. – 1072 с.
5. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / Прэтт У. ; [пер. с английского]. – М. : Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
6. Белозерский Л.А. Разностные гистограммы в технологии автоматического анализа изменений объектов по разновременным изображениям спутниковой съемки / Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина // Информатика. – 2009. – № 2. – С. 19-31.
7. Белозерский Л.А. Принципы селективно-яркостной сегментации изменений внешнего облика объекта моноспектральной космической съемки / Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина // Искусственный интеллект. – 2009. – № 4. – С. 395-408.
8. Belozerskii L.A. Estimation of the Informative Content of Histograms of Satellite Images in the Recognition of Changes in Local Objects / L.A. Belozerskii, L.V. Oreshkina // Pattern Recognition and image Analysis. – 2010. – Vol. 20, № 1. – P. 65-72.
9. Белозерский Л.А.. Моделирование гистограмм изображения дистанционного спутникового зондирования для анализа состояний объектов / Л.А. Белозерский.// Информатика. – 2008. – № 2.– С. 45-53.

Literatura

1. Tomina N.V. Avtomatizirovannaja obrabotka izobrazhenij biotkani v medicinskoj diagnostike. http://iauoo.narod.ru/magazine/tomina.htm.
2. Unser M. Sum and Difference Histograms for Texture Classification/ M. Unser. – IEEE Transactions on Pattern Analisys and Machine Intelligence – Volume: PAMI-8 Issue:1. P. 118-125.
3. Hammouche K. Multidemensional Texture Analysis for Unsupervised Pattern Classification/ K. Hammouche, J.-G. Postaire. – Pattern Recognition Techniques, Technology and Applications. Edited by: Peng-Yeng Yin, Publisher: InTech, November 2008. – P. 163–196 www.intechopen. com/download/ pdf/pdfs_id/5785.
4. Gonsales R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij. M.: TEHNOSFERA. 2006. 1072 s.
5. Prjett U. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij. M.: Mir, 1982. Kn. 2. 480 s.
6. Belozerskij L.A. Informatika. 2009. № 2. S. 19-31.
7. Belozerskij. L.A. Iskusstvennyj intellekt. 2009. № 4. S.395-408.
8. Belozerskii, L.A. Estimation of the Informative Content of Histograms of Satellite Images in the Recognition of Changes in Local Objects / L.A. Belozerskii, L.V. Oreshkina // Pattern Recognition and image Analysis. – 2010. Vol. 20, №. 1. P. 65-72.
9. Belozerskij L.A. Informatika. 2008. № 2. S. 45-53.

Статья поступила в редакцию 01.06.2012.